

抗磁悬浮热解石墨的光牵引运动仿真研究

余明芯, 曹明瑞, 李建郎*

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月23日; 录用日期: 2024年5月23日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

抗磁悬浮热解石墨的光学驱动实现了光对较大物体的直接操纵, 其具有远程控制与无接触的特点, 无需使用额外的导线连接来实现供源。目前基于该现象的相关光驱动机理仍有待完善, 特别是在特定的磁场环境下不同激光辐照方式对驱动物体运动方式的影响情况, 目前仍缺少有效的研究方法。为此, 本文采用理论模拟的方法, 针对热解石墨片在矩形阵列磁体上方沿激光辐照方向移动这一现象, 通过计算并分析热解石墨片在光驱动过程中相关物理量的变化来说明其驱动机理。首先介绍了抗磁悬浮光驱动现象中的相关物理量及其计算方法, 然后建立了基于磁场与热场耦合的抗磁悬浮光驱动仿真模型, 通过该模型成功得到了热解石墨片在激光辐照下不同磁场位置的磁势能及水平驱动力变化, 据此解释了该现象。设置了相关实验进行验证, 模拟结果与实验现象具有很好的一致性。此外基于磁热耦合的激光驱动模型, 对于分析类似的, 如光驱旋转运动也同样适用, 分析结果为磁悬浮光驱动器械及新型光能采集系统的设计提供了参考。

关键词

抗磁悬浮, 光驱运动, 热解石墨, 永磁体

Simulation Study on Optical Driving Mechanism of Diamagnetic Levitation Pyrolytic Graphite

Mingxin Yu, Mingrui Cao, Jianlang Li*

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 23rd, 2024; accepted: May. 23rd, 2024; published: May. 31st, 2024

*通讯作者。

文章引用: 余明芯, 曹明瑞, 李建郎. 抗磁悬浮热解石墨的光牵引运动仿真研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 3807-3817.
DOI: 10.12677/mos.2024.133347

Abstract

The optical drive of anti-magnetic levitation pyrolytic graphite realizes the direct manipulation of large objects by light. It has the characteristics of remote control and non-contact, and does not need to use additional wire connection to realize power supply. At present, the related optical driving mechanism based on this phenomenon still needs to be improved, especially the influence of different laser irradiation methods on the motion mode of driving objects in a specific magnetic field environment, and there is still a lack of effective research methods. Therefore, this paper uses theoretical simulation method to explain the driving mechanism of pyrolytic graphite sheet by calculating and analyzing the changes of related physical quantities in the process of light driving, aiming at the phenomenon that pyrolytic graphite sheet moves in the direction of laser irradiation above rectangular array magnets. Firstly, the related physical quantities and their calculation methods in the phenomenon of anti-magnetic levitation optical drive are introduced, and then the simulation model of anti-magnetic levitation optical drive based on the coupling of magnetic field and thermal field is established. Through this model, the changes of magnetic potential energy and horizontal driving force of pyrolytic graphite sheet at different magnetic field positions under laser irradiation were successfully obtained, and the phenomenon was explained accordingly. In addition, related experiments are set up to verify, and the simulation results are in good agreement with the experimental phenomena. In addition, the laser driving model based on magneto-thermal coupling is also applicable to the analysis of similar rotation motion of optical drive, and the analysis results provide reference for the design of magnetic suspension optical driving equipment and new optical energy collection system.

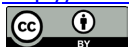
Keywords

Magnetic Levitation, Optically Driven Rotation, Pyrolytic Graphite, Permanent Magnet

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

磁悬浮技术因其具有的无摩擦特性，减少了物体间的接触磨损，已广泛应用于列车、电机、轴承等机械运动设备[1] [2] [3]。而热解石墨因其具有的优异抗磁特性，使其能在永磁铁提供的磁场中稳定悬浮[4] [5]，不仅如此，磁悬浮热解石墨还能通过光学的方法进行操纵，具有远程控制、无接触与无污染的特点。

2012年日本青山学院大学首次发现了抗磁悬浮热解石墨片被激光驱动的现象[6]，并成功实现了热解石墨片在激光控制下的平移及旋转运动。2015年，李建郎等人将热解石墨的光驱转动现象与激光器相结合[7]，开发了一种磁悬浮式的转盘激光器，在450 mW的泵浦光输入下得到了17.7 mW的输出功率，其斜坡效率为8.3%，通过使增益晶体旋转，可以有效抑制晶体的热效应，进一步增大激光器的输出功率。2022年Shen等人设计了一种基于磁悬浮热解石墨的光能收集装置[8]，通过光对光滑磁体表面的干涉以及石墨磁化强度随光吸收的线性变化，最终驱动热解石墨周期性振动，这种光磁效应可以将连续光能转化为振动动能，驱动光强度最低可达0.1 mW/cm²，振幅可以达到几十微米，驱动光的波长范围可以覆盖可见和红外波段，可以利用太阳光的整个波长范围。在上述研究的基础上，为了实现光驱动磁悬浮热解

石墨的更多样化的应用,除了进一步设计和改进磁体阵列、光源和石墨驱动器外,丰富和改进其相关理论也具有重要意义[9]。

对于磁悬浮热解石墨片在光驱动下的运动机理,已有研究仅在宏观上将其解释为光热导致的热解石墨片的磁化率变化[10],使悬浮于磁场中的热解石墨片的磁场力发生非均匀变化,从而导致其运动,但没有对该现象中某一具体驱动行为进行解释,主要原因是很难通过实时测量相关物理量的变化来具体说明该现象[11]。为此,本文从理论上对热解石墨片的光牵引现象进行分析,从磁场理论与热传导理论出发,建立了基于磁场与热场耦合的热解石墨片光驱动模型,通过模拟计算得到了热解石墨在运动周期中的磁力及势能变化,根据模拟结果清晰说明了热解石墨片在磁场中激光驱动的过程,此外还设置了相关实验进行验证,实验结果与数值模拟结果具有很好的一致性。分析结果为基于光热抗磁性变化的光机械致动器及新型光能转换系统提供了参考。

2. 数值计算

为分析悬浮抗磁物质在磁场中的运动状态,首先需要计算得到永磁体在空间中磁场分布,再计算抗磁物质在磁场中的受力及力矩[12][13],据此来判断抗磁物质的运动规律。抗磁悬浮系统为无电流的静电场,可采用等效磁荷法计算由永磁体产生的空间磁场分布[14][15],其中磁铁由等效磁荷分布模拟,通过电荷分布得到总磁场 \mathbf{H} ,进一步的可以得到抗磁物质所在区域的磁感应强度 \mathbf{B} 的分布。然后计算抗磁物质在磁场中的受力,抗磁物质在磁场中的受力大小可以等效为一定体积内所有磁偶极子在磁场中的受力,对于单个磁偶极子,其在磁场中的受力 f 可以表示为[15]:

$$f = (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{B} = \frac{1}{2\mu_0} \nabla (\chi_x B_x^2 + \chi_y B_y^2 + \chi_z B_z^2) \quad (1)$$

其中 \mathbf{M} 为抗磁物质在磁场中的磁化强度,如式(2)所示:

$$\mathbf{M} = \chi \cdot \mathbf{H} = \chi_x \cdot \mathbf{H}_x + \chi_y \cdot \mathbf{H}_y + \chi_z \cdot \mathbf{H}_z \quad (2)$$

其中 χ_x 、 χ_y 、 χ_z 分别为抗磁物质在 x 、 y 、 z 方向的磁化率。对于热解石墨,常温下其在 x 、 y 方向上的磁化率为 -0.85×10^{-4} [16],垂直磁化率为 -4.5×10^{-4} [16]。通过式(1)在不同方向进行积分,可以得到抗磁物质在不同方向的受力为:

$$F_x = \frac{\chi_x}{\mu_0} \iiint B_x \frac{dB}{dx} dV \quad (3)$$

$$F_y = \frac{\chi_y}{\mu_0} \iiint B_y \frac{dB}{dy} dV \quad (4)$$

$$F_z = \frac{\chi_z}{\mu_0} \iiint B_z \frac{dB}{dz} dV \quad (5)$$

式中 F_x 、 F_y 、 F_z 分别为抗磁物质在沿 x 、 y 、 z 轴上的力大小。热解石墨片在磁场中稳定悬浮时重力与沿 z 方向的磁力大小相等,方向相反,因此可以得到以下表达式:

$$F_z = mg = \rho g V \quad (6)$$

将式(5)代入上式,可以得到:

$$\frac{\rho g \mu_0}{\chi_z} = B_z \frac{dB}{dz} \quad (7)$$

根据该式可以求得热解石墨在磁场中的悬浮高度。

最后结合势能的变化分析了热解石墨片的运动状态,抗磁物质在磁场中的势能 U 可以表示为[17] [18]:

$$U = -\int_V \mathbf{M} \cdot \mathbf{B} dV \quad (8)$$

由于物体在磁场中总是由磁势能高的位置向磁势能低的位置移动,因此通过计算抗磁物质在不同位置的势能,可以确定其在磁场中的稳定悬浮位置。

3. 磁悬浮热解石墨片在矩形阵列磁体上方的光驱平移运动分析

3.1. 抗磁悬浮热解石墨光驱动模型的建立

图 1(a)显示了激光对热解石墨片的光牵引示意图,实验装置由矩形阵列磁铁、圆形热解石墨片以及激光光源组成。激光对热解石墨的驱动过程为,当激光照射到热解石墨边缘,热解石墨受到沿激光方向的合力并发生运动,当激光光束与热解石墨的圆心基本重合,热解石墨片停止运动。如果此时重新移动激光束到热解石墨片边缘,热解石墨会重复以上过程并继续开始平移,不断重复以上过程,热解石墨片可实现在激光驱动下的连续平移驱动。此外,矩形阵列磁铁的磁极分布如图 1(b)所示,由于磁体的充磁方向为轴向方向,沿轴两端有相反的磁极分布。此外,为了磁体间实现相互排列,相邻磁体的磁化方向相反排列,形成了具有二维周期特性的磁场分布,热解石墨片能稳定悬浮于该磁场中。

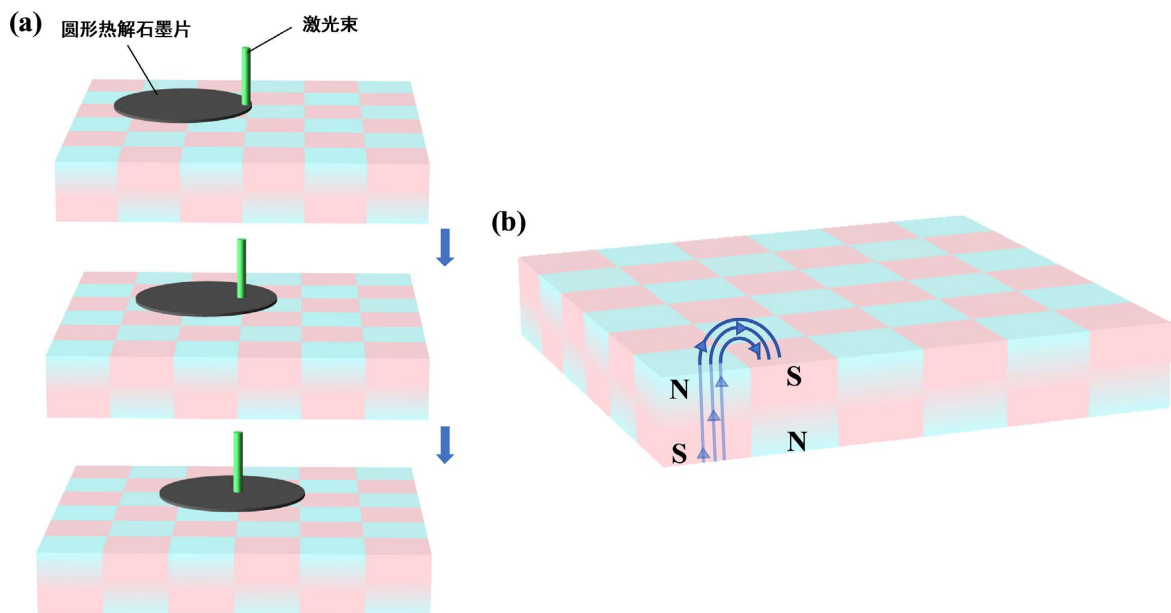


Figure 1. Schematic diagram of optical traction of magnetic suspension pyrolytic graphite sheet. (a) Driving process of pyrolytic graphite sheet by laser; (b) Magnetic pole distribution of rectangular array magnets

图 1. 磁悬浮热解石墨片的光牵引示意图。(a) 激光对热解石墨片的驱动过程; (b) 矩形阵列磁铁的磁极分布

首先分析了热解石墨片在磁场中的悬浮情况,利用多物理场仿真软件 COMSOL 的磁场无电流模块建立了热解石墨片在矩形阵列磁体表面的磁场悬浮模型,其中单个磁铁的规格为(4 mm × 4 mm × 5 mm),磁铁的剩余磁通密度设置为 1.4 特斯拉(T),磁化方向为 z 轴方向,并采用了 5 × 5 规格的永磁体阵列。而圆形热解石墨片的尺寸为(φ 10 × 0.05 mm, 直径×厚度),热解石墨片的初始相对磁导率设置为 0.9996。图 2 显示了该磁场模型的磁通密度分布情况,由图可知,永磁阵列的磁场呈周期分布,且在相邻两磁体交界处具有最大的磁感应强度分布。而热解石墨表面的磁感应强度较小,约为 0.4 T。

接下来分析了热解石墨片在矩形阵列磁体上方的受力情况，图 3(a)显示了圆形热解石墨片在矩形阵列磁铁上方的稳定悬浮位置，此时热解石墨片的圆心与相邻磁体的交界面在竖直方向上重合，此外，对于热解石墨片在磁场中的悬浮高度可以通过式(2)得到，经计算热解石墨片的悬浮高度约为 0.6 mm。图 3(b)显示了热解石墨在磁场中稳定悬浮时面内的水平磁力分布，由图可知，热解石墨片的受力分布受到了永磁体的形状及位置的影响，其受力分布也具有周期特性，在 x - y 平面具有双重对称性，因此，此时受力平衡，热解石墨将稳定悬浮于磁场中。

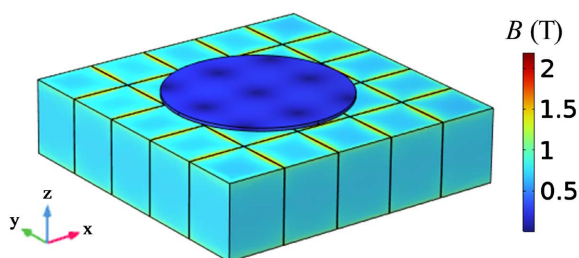


Figure 2. Magnetic flux density distribution of magnetic field model
图 2. 磁场模型的磁通密度分布

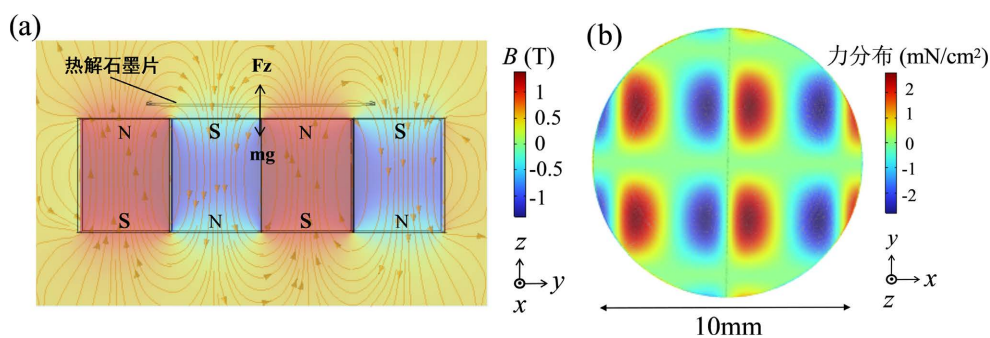


Figure 3. Stable suspension state of pyrolytic graphite sheet in magnetic field. (a) The suspension height of pyrolytic graphite in magnetic field; (b) The stress distribution of pyrolytic graphite sheet when it is stably suspended
图 3. 热解石墨片在磁场中的稳定悬浮状态。(a) 热解石墨在磁场中的悬浮高度；(b) 热解石墨片稳定悬浮时的受力分布图

光对热解石墨的辐照是导致其转动的重要条件之一，当光照射到热解石墨表面，热解石墨吸收能量并产生热激发电子，而电子的热激发使原子或分子磁矩在磁场中排列的方向性减弱，降低了热解石墨的抗磁性，其受力状态发生变化。热解石墨的磁化率与温度的关系为：在平面内 $\chi_x = \chi_y = (0.25T - 135) \times 10^{-6}$ ，轴向为 $\chi_z = (T - 743) \times 10^{-6}$ [10]。因此分析了激光辐照对热解石墨片温度分布的影响，利用 COMSOL 软件的固体传热模块模拟了热解石墨的激光加热过程。将高斯分布的沉积光束功率应用热解石墨片表面，模拟热解石墨片的激光加热。表 1 显示了模拟的热解石墨片的相关参数，其中激光照明点距热解石墨片中心 5 mm，初始温度为 20℃，激光功率为 200 mW。

根据以上模型，得到了热解石墨片在局部激光辐照下的温度分布情况，结果如图 4 所示。从图中可以观察到，在激光辐照区域，热解石墨片具有最高温度分布，由于热解石墨片在平面内具有的高导热率，在水平面内，远离激光辐照区域，热解石墨片的温度下降较快，导致了热解石墨片在局部激光照射下表面温度呈梯度形式分布，其最大温差约为 4.3℃。

作为对比，我们利用热像仪测量了热解石墨片在激光照射下的温度分布。其中激光照射点距离热解石墨片圆心 5 mm。测量结果如图 5 所示，热解石墨片表面在光照位置具有最高温度，在光照中心区域(SP1)，

其温度达到了 28.5℃，在远离光照中心的边缘区域(SP2)，温度下降为 24.7℃，整个热解石墨片表面产生了 3.8℃的温差，温度分布情况与图 4 的模拟结果基本一致。结果表明热解石墨片在激光照射下形成了局部的高温区域，使热解石墨片的温度分布不均匀，并影响其受力状态。

Table 1. Relevant parameters of pyrolytic graphite used in simulation

表 1. 模拟所用的热解石墨的相关参数

参数	值
导热系数(x, y 方向)	1000 W/m·K
导热系数(z 方向)	20 W/m·K
恒压热容	710 J/kg·K
对流冷却系数	270 W/m ² ·K
表面发射率	0.9
密度	2.2 g/mm ³
半径	6.5 mm
厚度	50 um

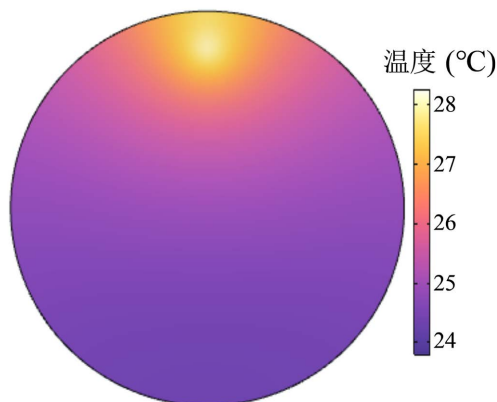


Figure 4. Magnetic flux density distribution of magnetic field model

图 4. 激光照射下热解石墨片的温度分布

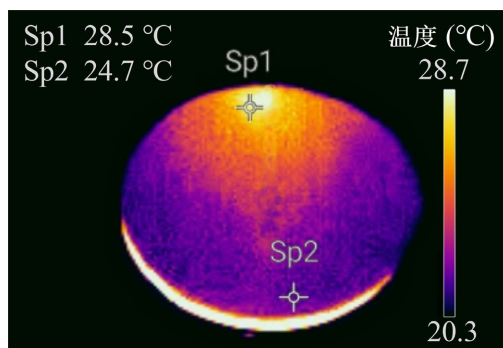


Figure 5. Temperature distribution diagram of pyrolytic graphite sheet measured by infrared instrument under laser irradiation

图 5. 红外仪测量的热解石墨片在激光照射下的温度分布图

上述分别讨论了磁场与光照对热解石墨片的影响并建立了相关理论分析模型，接下来计算热解石墨

片在激光辐照下的势能及磁场力的变化,为此,将以上两种模型进行耦合,首先通过激光加热模型得到热解石墨片在不同激光照射位置下的温度分布,如图6所示,图中显示了热解石墨片在激光驱动过程中由于运动导致了激光辐照位置的变化,而激光在热解石墨片表面不同位置的辐照将导致不同的温度分布,从图中可以看出,激光辐照位置越接近边缘,热解石墨片表面具有的温度差越大。进一步,将模拟的温度分布结果导入磁场模型,以温度大小确定磁场模型中热解石墨磁化率值,最终得到了热解石墨片在磁场中不同位置以及不同光照位置下的磁势能及水平磁力。

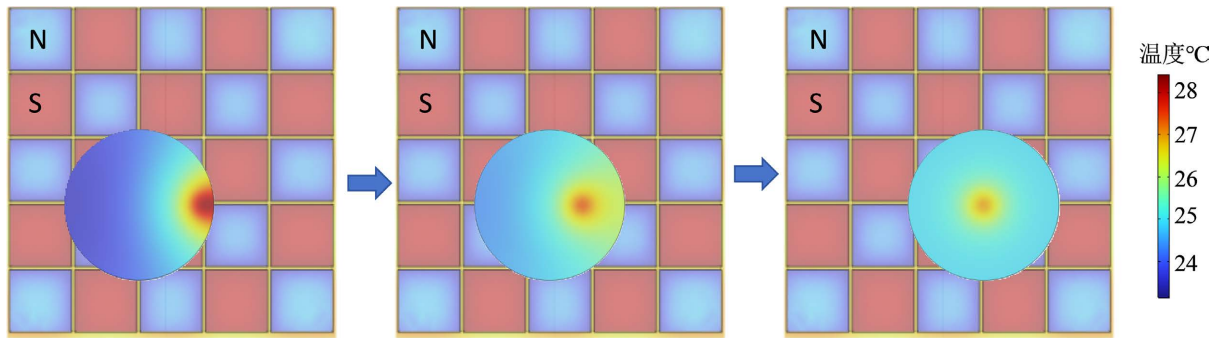


Figure 6. Temperature distribution of pyrolytic graphite in different illumination positions

图6. 热解石墨在不同光照位置的温度分布情况

3.2. 抗磁悬浮热解石墨的水平磁力及势能计算

根据以上所建立的光驱动模型,对热解石墨片的磁力及势能进行计算,首先确定分析过程,并设定相关参考位置,以便于分析,由于矩形磁铁产生的磁场具有周期性,热解石墨片在每个周期内的受力情况是一致的,因此我们只需说明光照下热解石墨片在磁场周期内的任意位置上都能沿同一方向移动,即说明了热解石墨片在矩形阵列磁体表面的光牵引现象。我们选取了如图7所示的光驱动过程来进行分析,令圆形热解石墨片圆心所在的初始位置为 o 点,激光辐照位置为 e 点,在激光的作用下,热解石墨片从 o 点开始沿 $+x$ 方向移动,直到圆心与激光辐照点 e 重合,此时热解石墨片静止,刚好完成一个磁场周期移动,其中 o 点到 e 点的距离 d 刚好为矩形磁铁边长的长度。接下来模拟计算了热解石墨片从 o 点到 e 点间不同位置的磁力及势能。

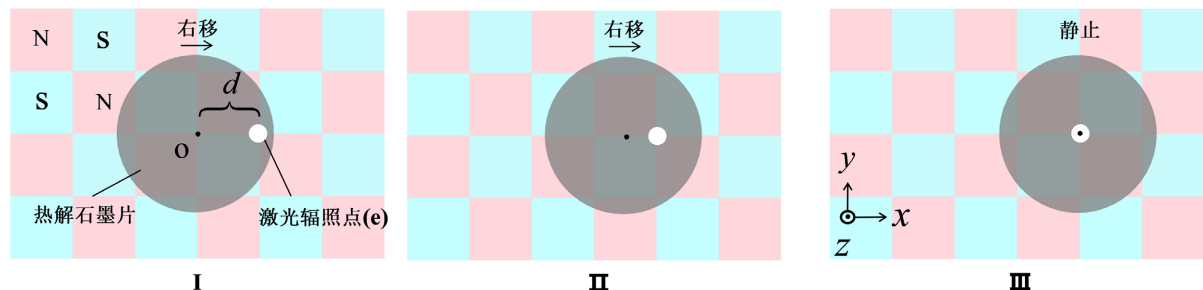


Figure 7. Different stages of circular pyrolytic graphite sheet driven by laser

图7. 圆形热解石墨片的激光驱动的不同阶段

数值模拟结果如图8所示,分别计算了激光功率为0、30 mW、60 mW与90 mW时热解石墨片在运动周期内沿 x 方向的水平磁力及势能。图8(a)为激光功率为0的模拟结果,首先观察水平磁力变化,由图可知,热解石墨片在前半周期内时受到 $-x$ 方向的磁力,在后半周期内时受到 $+x$ 方向的磁力,热解石墨

片在周期初始位置、中点位置及末尾位置受力为 0。然后进一步分析其势能分布情况，由图可知，热解石墨片的磁势能先增大后减小，其在周期初始位置与末尾位置的势能最低。因此，结合上述分析结果，热解石墨片在无光照时将稳定悬浮于周期初始位置。

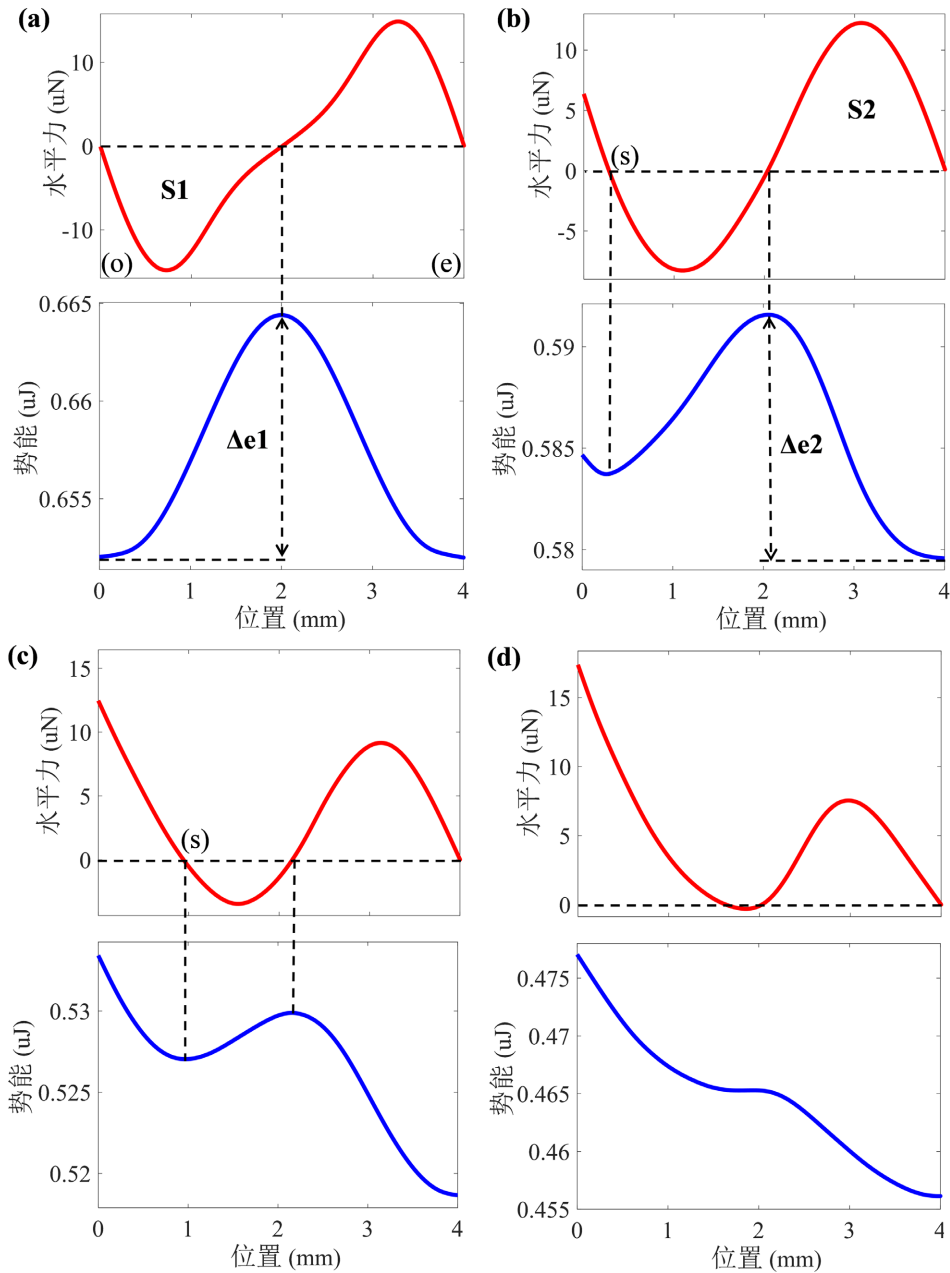


Figure 8. Changes of stress and potential energy of pyrolytic graphite sheet with suspension position driven by different power lasers. (a) 0 mW, (b) 30 mW, (c) 60 mW, (d) 90 mW

图 8. 不同功率激光驱动下热解石墨片的受力和势能随悬浮位置的变化。(a) 0 mW, (b) 30 mW, (c) 60 mW, (d) 90 mW

接下来讨论了光照存在时热解石墨片的运动情况，当施加的激光功率为 30 mW 时，结果如图 8(b) 所示，其中，令磁力的正方向为热解石墨片的光驱动方向。由图可知，此时热解石墨片在初始位置的受力大于 0，因此热解石墨片将在磁场力的作用下向激光辐照位置发生移动，当移动到图中 s 点所在位置时，

热解石墨片所受的水平磁力减小为 0，此时将稳定悬浮于该位置。同时，观察热解石墨片的势能变化曲线，发现其在初始悬浮位置的势能不再为最小值，而是在初始位置附近存在一个势能极小值点，极小值的位置同样位于图中 s 点所在位置，说明模拟得到的两曲线结果的一致性。此外，由于激光功率较小，热解石墨片由光照导致的水平力不足以突破磁场势阱，热解石墨片仅能在磁场周期内移动一小段距离。

进一步增大功率到 60 mW，结果如图 8(c)所示，发现随着激光功率的增大，热解石墨在初始位置受到的水平磁力进一步增大，在磁场中的稳定悬浮位置距初始位置的距离更远，但此时热解石墨片仍然无法移动到终点位置。当激光功率增大为 90 mW 时，结果如图 8(d)所示，发现热解石墨片在整个周期位置内的受力基本大于 0，同时，热解石墨片的势能在周期内呈递减的变化趋势，说明其具有从初始位置向末尾位置移动的趋势。此时热解石墨片将从初始位置移动到终点位置，并完成一个周期移动。根据以上分析，两种变化曲线都说明了热解石墨片在不同功率激光下的光牵引过程，且结果具有很好的一致性。

进一步的我们还讨论了热解石墨的势能与磁场力间的关系，由电磁场的基本原理可知，磁场对物体做正功，物体的磁势能减少，相反，磁场对物体做负功，磁势能增加量。如图 8(a)为例，当激光功率为 0 时，热解石墨在前半周期受到沿 $-x$ 方向的力，磁场对热解石墨做负功，热解石墨的势能增加，在前半周期内对磁力与位移的乘积进行积分，可以得到磁场对热解石墨所做的功约为 0.012 μJ ，即区域 S_1 的面积，恰好与势能的增加值 Δe_1 相同。此外，对于图 8(b)中磁势能的减少量 Δe_2 与磁场做功大小 S_2 具有类似分析结果。说明根据两种曲线得到的热解石墨片的势能变化量基本相同，也说明了数值模拟结果之间的一致性。

以上通过数值模拟说明了热解石墨片在矩形阵列磁体上方的光牵引运动现象，接下来结合实验进一步分析这一过程。实验中分别采用了规格为直径为 20 mm 与 10 mm 的圆形热解石墨片，其厚度为 50 μm ，驱动光源采用波长为 1064 nm 的半导体耦合激光。此外，使用的矩形阵列磁体如图 7 所示，采用的矩形磁铁的规格分别为(4 mm \times 4 mm \times 10 mm，长 \times 宽 \times 高)与(10 mm \times 10 mm \times 10 mm，长 \times 宽 \times 高)，磁体沿高的方向进行充磁，剩余磁通密度为 1.4 特斯拉(T)，矩形阵列磁铁的数量规格为(18 \times 18)，组成了一个方形磁悬浮平台，图 9 显示了直径为 20 mm 的圆形热解石墨片在阵列磁体表面的光牵引现象，在 0 s 时，激光束照射在热解石墨片边缘，热解石墨片开始沿激光方向平移运动，经过约 1.5 s 的时间，热解石墨片停止移动。

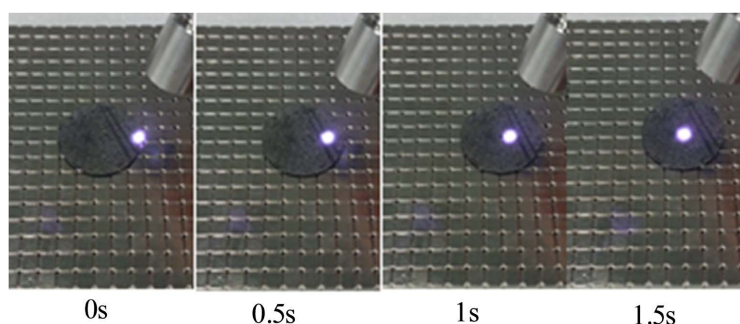


Figure 9. Optical traction phenomenon of pyrolytic graphite sheet
图 9. 热解石墨片的光牵引现象

根据图 7，当激光以不同功率照射到热解石墨片边缘时，会导致热解石墨片在磁场中的稳定悬浮位置发生改变，只有当激光功率高于一定值时，热解石墨片才能实现在完整的磁场周期内的运动。因此，测量了热解石墨片在不同功率激光驱动下偏移初始位置的距离，图 10(a)为直径 10mm 的热解石墨片在 4 \times 4 \times 10 mm 矩形磁铁上方的测量值，由图可知，随着激光功率的增大，热解石墨片偏离初始位置的距离更

远, 在激光功率小于 80 mW 时, 热解石墨片能被驱动一段距离, 但不能移动到终点位置。当功率大于 80 mW 时, 由激光非均匀辐射导致的磁场力突破了原有磁场的势阱, 从而实现了热解石墨片在磁场中的周期移动。

此外, 为了说明实验的普遍性, 还测量了热解石墨片在 $10 \times 10 \times 10$ mm 规格永磁体上方的光驱动规律, 结果如图 10(b)所示, 由图可知, 随着激光功率的增加, 热解石墨片的最大驱动距离相应增加, 其曲线变化规律与图 10(a)基本一致, 不同的是, 随着永磁体规格的改变, 热解石墨的最低驱动功率发生变化, 由图可知, 此时 120 mW 为热解石墨片实现连续牵引运动的最低激光功率。

图 10(c)为模拟计算得到的在不同功率下热解石墨的驱动位移, 其中矩形磁铁的规格为 $4 \times 4 \times 10$ mm, 计算结果表明, 热解石墨片的偏移距离随激光功率的增加而增大, 当激光功率小于 93 mW 时, 热解石墨片只能被激光驱动一段距离并停止下来, 但不能移动到最终位置。当功率大于 93 mW 时, 达到了热解石墨片的最低牵引功率, 热解石墨完成了周期运动, 模拟结果与实验测量结果的光驱动规律基本一致, 验证了上述数值模拟结果的准确性。最终说明了热解石墨片在矩形阵列磁体上方的光驱动规律。同时也说明了通过该理论模型分析抗磁悬浮物体的光驱动行为是可行的。

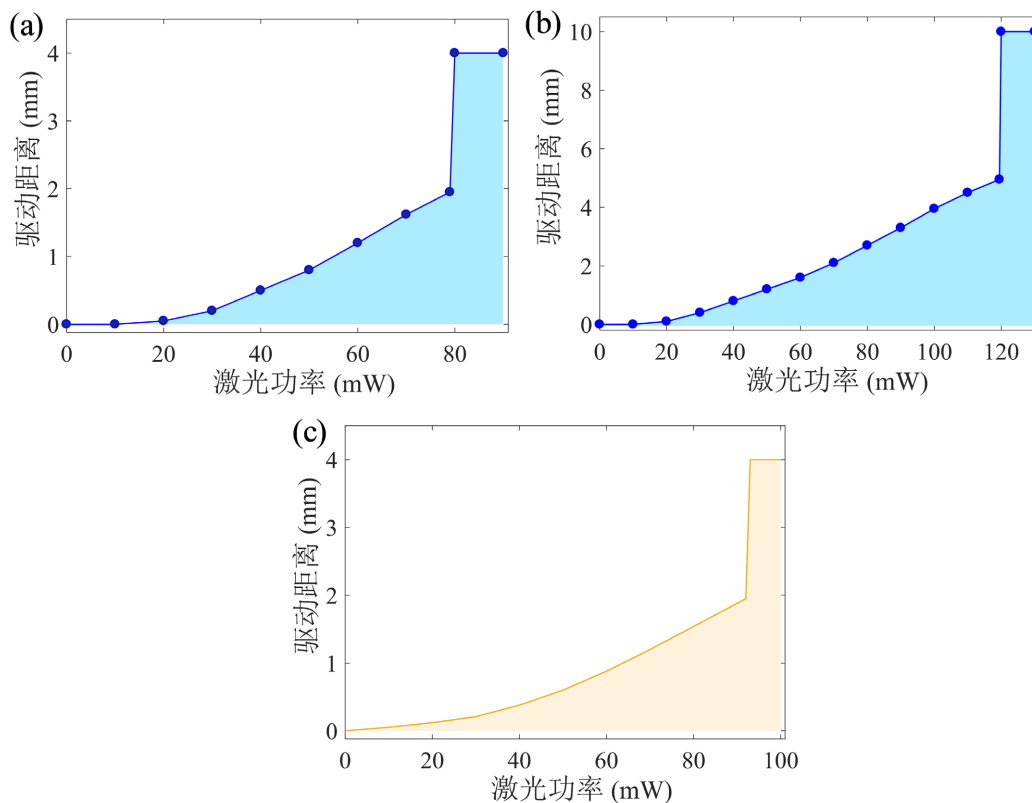


Figure 10. Offset distance of pyrolytic graphite sheet driven by different power lasers. (a) Measured value (magnet size $4 \times 4 \times 10$ mm), (b) Measured value (magnet size $10 \times 10 \times 10$ mm), and (c) Simulation value (magnet size $4 \times 4 \times 10$ mm)

图 10. 热解石墨片在不同功率激光驱动下的偏移距离。(a) 测量值(磁体规格 $4 \times 4 \times 10$ mm), (b) 测量值(磁体规格 $10 \times 10 \times 10$ mm), (c) 模拟值(磁体规格 $4 \times 4 \times 10$ mm)

4. 结论

本文研究了悬浮于矩形阵列磁铁表面的圆形热解石墨片在激光辐照下的平移运动现象, 采用了数值模拟方法对其进行分析, 在多物理场仿真软件 COMSOL 中建立了磁场与热场耦合的抗磁悬浮光驱动模型,

得到了热解石墨片在不同磁场位置下的水平磁力与磁势能的变化,分析结果表明,在无激光辐照条件下,热解石墨片在稳定悬浮位置的水平磁力为 0,且在初始位置具有最小的势能。当对热解石墨片施加光照后,热解石墨片产生了沿激光方向的磁力,但同时受到矩形磁铁磁势阱带来的阻碍力,当激光功率达到一定阈值,热解石墨片由激光辐照导致的水平驱动力突破了磁场势阱,实现了周期移动。此外,还通过实验进行验证,实验现象与数值计算结果基本一致,很好的解释了热解石墨在周期磁场中的光驱动机制,阐明了激光与抗磁物质的相互作用规律。为该类现象的研究提供了一种可行的分析方法,也为基于光机械致动器的设计提供了参考。

基金项目

国家自然科学基金(62175245)。

参考文献

- [1] Melville, P.H. (1973) Magnetic Propulsion for Magnetically Levitated Trains. *Cryogenics*, **13**, 716-717. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(73\)90186-0](https://doi.org/10.1016/0011-2275(73)90186-0)
- [2] Bassani, R. (2005) Levitation of Passive Magnetic Bearings and Systems. *Tribology International*, **39**, 963-970. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.10.003>
- [3] Shu, Q., Cheng, G., Susta, T. J., et al. (2005) Magnetic Levitation Technology and Its Applications in Exploration Projects. *Cryogenics*, **46**, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2005.10.009>
- [4] Klemens, P.G. and Pedraza, D.F. (1994) Thermal Conductivity of Graphite in the Basal Plane. *Carbon*, **32**, 735-741. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(94\)90096-5](https://doi.org/10.1016/0008-6223(94)90096-5)
- [5] Senchenko, N.V. and Belikov, S.R. (2018) Experimental Investigation of Density of Pyrolytic Graphite up to Melting Point. *Journal of Physics: Conference Series*, **946**, Article ID: 012105. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/946/1/012105>
- [6] Masayuki, K. and Jiro, A. (2012) Optical Motion Control of Maglev Graphite. *Journal of the American Chemical Society*, **134**, 20593-20596. <https://doi.org/10.1021/ja310365k>
- [7] Han, X. and Li, J. (2005) Maglev Rotating Disk Laser. *Chinese Optics Letters*, **13**, 1403-1406.
- [8] Yuying, L., Hongchun, L. and Jun, Q. (2021) Magnetic Levitation Photothermal Actuator with Sunlight Traction. *Smart Materials and Structures*, **30**, Article ID: 085007. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac0672>
- [9] Yee, S., Oney, L. and Cosby, T. et al. (2021) Photothermal Actuation of Levitated Pyrolytic Graphite Revised. *APL Materials*, **10**, Article ID: 101107. <https://doi.org/10.1063/5.0061390>
- [10] Miriam, W.E., Steven, Y. and Kelly, D. et al. (2019) Optomechanical Actuation of Diamagnetically Levitated Pyrolytic Graphite. *IEEE Transactions on Magnetics*, **55**, 1-6. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2892332>
- [11] 童鑫, 唐锋, 李建郎. 基于永磁体离心量对磁悬浮热解石墨片光驱转动现象的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 296-302.
- [12] Norio, I. and Kazunori, M. (2022) Dynamic and Fluctuation Properties of a Graphene Disk Levitated by a Diamagnetic Force in Air. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **55**, Article ID: 285002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac683c>
- [13] Inui, N. (2023) Stabilizing Diamagnetic Levitation of a Graphene Flake through the Casimir Effect. *Physics*, **5**, 923-935. <https://doi.org/10.3390/physics5030060>
- [14] 李景天, 宋一得, 郑勤红, 等. 用等效磁荷法计算永磁体磁场[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 1999, 19(2): 33-36.
- [15] Niu, C., Lin, F., Wang, Z. M., et al. (2018) Graphene Levitation and Orientation Control Using a Magnetic Field. *Journal of Applied Physics*, **123**, Article ID: 044302. <https://doi.org/10.1063/1.5005539>
- [16] Nguyen, J., Contera, S. and Garcia, I.L. (2016) Magneto-Electrical Orientation of Lipid-Coated Graphitic Micro-Particles in Solution. *RSC Advances*, **6**, 46643-46653. <https://doi.org/10.1039/C6RA07657B>
- [17] Inui, N. (2021) Numerical Study on Stability of Diamagnetic Levitation of a Single-Layer Graphene Sheet. *Journal of Applied Physics*, **18**, Article No. 130. <https://doi.org/10.1063/5.0069250>
- [18] Inui, N. and Maebuchi, K. (2022) Dynamic and Fluctuation Properties of a Graphene Disk Levitated by a Diamagnetic Force in Air. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **55**, Article ID: 285002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac683c>